

⑯ BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑯ **Patentschrift**
⑯ **DE 197 10 714 C 1**

⑯ Int. Cl. 6:

G 05 D 3/00

G 05 D 3/12

G 02 B 26/10

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑯ Patentinhaber:

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der
Wissenschaften e.V., 80539 München, DE

⑯ Vertreter:

v. Bezold & Sozien, 80333 München

⑯ Erfinder:

Neher, Erwin, Prof. Dr., 37120 Bovenden, DE;
Würriehausen, Frank, 37120 Bovenden, DE

⑯ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE	43 22 694 A1
DD	2 91 217 A5
US	55 57 156
US	49 84 857
US	46 48 685
US	46 38 156
US	41 55 620

Handbook of Biological Confocal Microscopy,
Plenum Press, New York 1995, S. 139-154 und
S. 459-478;

⑯ Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung schneller periodischer Bewegungen

⑯ Ein Verfahren zur Bewegung eines Gegenstands, derart, daß eine Ortskoordinate des Gegenstands mindestens in einem Periodenteilintervall periodisch an eine Zielfunktion $y'(t)$ angepaßt ist, umfaßt eine Parametrisierung der Zielfunktion als Reihenentwicklung gemäß $y'(t) = \sum a_1 \cdot a_2(t)$ eine Bestimmung von n Führungsparametern a_1, a_2, \dots, a_n , für die im Periodenteilintervall für eine Führungsfunction $y(t) = \sum a_1 \cdot a_2(t)$ ein Optimierungskriterium erfüllt ist, und eine Ansteuerung des Gegenstands, derart, daß dessen Ortskoordinate der Führungsfunction entspricht. Bei einem Regelungsverfahren zur Einstellung einer veränderlichen Regelgröße für eine Treiberfunktion eines Antriebsmittels mit einer Amplitudendämpfung und einer Phasenverzögerung wird die Treiberfunktion mit Amplituden- bzw. Phasenkompensationsparametern gebildet.

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bewegung eines Gegenstands, insbesondere zur Steuerung einer periodischen Bewegung eines Reflektorelements, wie z. B. eines Galvanometerspiegels zur schritt- oder rasterartigen Ablenkung eines Laser-Abtaststrahls, und Vorrichtungen zur Implementierung der Verfahren.

In der Meß- und Experimentiertechnik besteht häufig die Aufgabe, ein zu untersuchendes System (Probe) bezüglich einer bestimmten Meßgröße rasterartig abzutasten (scannen). In einem Mikroskop ist beispielsweise eine Probe mittels eines beweglichen Umlenkspiegels mit einem Lichtsignal abzutasten. Die Auslenkung des Umlenkspiegels soll einem bestimmten Zeitmuster folgen, an das eine Datenaquisition angepaßt ist. Ein anderes Beispiel ist die Scanbewegung von feldformenden Elementen (z. B. Gitter) in ortsauf lösenden, elektronenspektroskopischen Analysatoren.

Probleme bei der Ansteuerung zur Erzeugung von Abtastbewegungen werden im folgenden am Beispiel eines Ablenkspiegels eines konfokalen Laser-Fluoreszenz-Scanningmikroskops (abgekürzt: LSM) erläutert.

Bei der Zeilenablenkung im LSM muß der Laserstrahl mit möglichst linearem Zeitverlauf zeilenartig über ein Objekt oder einen Winkelbereich geführt werden. Dies erfolgt in der Regel mit Galvanometerspiegeln, denen mit einem Triebsignal der gewünschte Zeitverlauf des Ablenkwinkels aufgeprägt wird.

Standardmäßig werden rückgekoppelte Galvanometerspiegel mit einem Winkelsensor verwendet (siehe E. H. K. Stelzer in "Handbook of Biological Confocal Microscopy", Plenum Press, New York 1995, S. 139-154). In einer Rückkopplungsschaltung mit analoger Verstärkung wird das Sensorsignal mit einem Führungssignal verglichen. Mit einem entsprechend gebildeten Stellsignal wird dann dem Spiegel die gewünschte Auslenkung aufgeprägt. Das Führungssignal kann beispielsweise eine lineare Funktion sein. Wegen der Einschwingzeit der Spiegel von rd. 0.5 bis 2 ms bei abrupter Auslenkung werden jedoch lediglich Abtastraten von rd. 500 Hz erzielt, was eine Beschränkung für Echtzeituntersuchungen darstellt.

Zur Erzielung höherer Abtastraten werden die Spiegel rückkopplungsfrei freischwingend bei einer vorbestimmten Frequenz (beispielsweise bei einer Resonanzfrequenz) des Spiegels betrieben. In diesem Fall erfolgt die Spiegelauslenkung im wesentlichen sinusförmig. Die Datenaufnahme (Breite der Meßintervalle) ist dementsprechend ungleichförmig, was sich nachteilig auf die Dateninterpretation auswirkt. Daher wird häufig nur ein kleiner Auslenkungsbereich um den Nullpunkt herum, wo die Sinusfunktion annähernd linear ist, zur Datenaufnahme verwendet. Dies führt jedoch zu dem Nachteil, daß nur ein Bruchteil (z. B. 30%) des Arbeitszyklus einer vollen Umlenkperiode zur Datenaufnahme zur Verfügung steht. Zusätzlich kann nach der Datenaufnahme eine aufwendige Korrektur durchgeführt werden, um das erfaßte Bild zu linearisieren (siehe Tsien et al. in "Handbook of Biological Confocal Microscopy", Plenum Press, New York 1995, S. 459-478). Freischwingende Spiegel haben ferner den Nachteil einer geringen Langzeitstabilität. Neben den genannten Problemen ist bei den Resonanzsystemen nachteilig, daß der Betrieb auf eine feste Resonanzfrequenz festgelegt ist, die als mechanischer Parameter nicht veränderlich ist und die bei Überlagerung mit anderen Geräteeigenfrequenzen zu unerwünschten Schwebungen führen kann.

Ein weiteres Problem bei der LSM-Spiegelsteuerung ist die Erzielung einer ausreichenden Phasenstabilität beim Richtungswechsel der Bewegung. Daher wird bei herkömmlichen LSM häufig zur Vermeidung eines Versatzes zwischen aufeinanderfolgenden Abtastzeilen die Hälfte der Arbeitszyklen verworfen und jeweils nur das Abtasten bei einer Spiegelbewegung in einer vorbestimmten Richtung zur Datenaufnahme verwendet.

Generell besteht also bei einem LSM das Problem, daß bei rückgekoppelter Spiegelansteuerung mit einer linearen Führungsfunktion die Betriebsfrequenz begrenzt ist und bei rückkopplungsfreier Spiegelansteuerung zwar höhere Frequenzen erzielbar sind, dies aber nur mit verminderter Stabilität und unter erhöhtem Zeit- und Verarbeitungsaufwand. Dieses am Beispiel der LSM illustrierte Problem tritt bei allen Anwendungen auf, bei denen ein Gegenstand mit trüger Masse entsprechend einer Führungsfunktion schnell periodisch bewegt werden soll. Dies betrifft z. B. generell bewegte Abtastreflektoren, z. B. in Laser-Druckern oder bei Lichteffektdarstellungen (Lasershows), aber auch bewegte Abtastsignallquellen oder dergleichen.

Es ist allgemein bekannt, daß in Regelkreisen mit Analogverstärkung frequenzabhängig Amplituden- und Phasenfehler auftreten können. Dieser Erscheinung wird üblicherweise durch eine Erhöhung des Verstärkungsfaktors begegnet. Dies ist jedoch nur begrenzt möglich, da im Regelkreis selbsterregte Schwingungen auftreten können oder der Verstärker in einen nichtlinearen Betriebsbereich gelangt. In beiden Fällen ergeben sich bei der geregelten periodischen Bewegung z. B. von Reflektorelementen unannehbare Störungen durch unerwünschte Frequenzkomponenten. Dies führt wiederum zu einer Beschränkung auf niedere Betriebsfrequenzen.

Aus US 5 557 156 ist ein Verfahren zur Steuerung eines Scanning-Mikroskops bekannt, bei dem eine Scanner-Einrichtung mit einer Spannung angesteuert wird, die eine parametrische Zeitfunktion ist. Je nach den erfaßten Positionen der Scanner-Einrichtung werden laufend die Parameter der Zeitfunktion nachgeregelt.

Weitere Scanner-Einrichtungen sind aus DE 43 22 694 A1, US 4 984 857, US 4 648 685 und US 4 638 156 bekannt. Aufgabe der Erfindung ist es, ein verbessertes Verfahren zur Bewegung eines Gegenstands, insbesondere zur Steuerung einer periodischen Bewegung eines Reflektorelements, anzugeben, mit dem die Beschränkungen herkömmlicher Prozeduren überwunden und insbesondere eine erhöhte Bewegungsfrequenz, Genauigkeit, Langzeitstabilität und Phasenstabilität erzielt werden können. Es ist ferner Aufgabe der Erfindung, ein verbessertes Verfahren zur Ermittlung einer optimalen Führungsfunktion zur Reglung einer Bewegung eines Gegenstandes anzugeben. Aufgabe der Erfindung ist es auch, Vorrichtungen zur Implementierung der Verfahren bereitzustellen.

Diese Aufgaben werden mit Verfahren bzw. Vorrichtungen mit Merkmalen gemäß den Ansprüchen 1, 9 bzw. 15 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Der Erfindung liegt gemäß einem ersten Aspekt die Idee zugrunde, einen Gegenstand periodisch so zu bewegen, daß sich eine Ortskoordinate des Gegenstands entsprechend einer Führungsfunktion ändert, die sich aus einer Zielfunktion durch Parametrisierung mit Zielparametern mittels Reihenentwicklung und anschließende Optimierung der Zielparameter zur Bildung der Führungsfunktion mit einer endlichen Zahl von Führungsparametern ergibt.

Die Zielfunktion entspricht dem Bewegungsablauf, dem der Gegenstand idealerweise folgen soll, dies aber aufgrund

seiner Massenträgheit nicht in allen Phasen des Arbeitszyklus (Periode der Bewegung) kann. Die Zielfunktion kann beispielsweise eine lineare Dreiecksfunktion oder eine lineare Rampenfunktion sein. Die Reihenentwicklung ist vorzugsweise eine Fourier-Reihenentwicklung, die nur eine endliche Zahl der Glieder umfaßt, die im realen, trägen System einen Frequenzbeitrag liefern können.

Die Bildung der Führungsfunktion erfolgt durch Veränderung der Zielparameter (beispielsweise Fourierkoeffizienten) in Führungsparameter derart, daß in einem Periodenteilintervall des Arbeitszyklus ein bestimmtes Optimierungskriterium erfüllt ist.

Das Optimierungskriterium kann beispielsweise so bestimmt sein, daß im Periodenteilintervall die Führungsfunktion maximal an die Zielfunktion angepaßt oder die Beschleunigung des Gegenstands (gegebenenfalls unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen) minimal ist. Es wurde festgestellt, daß mit dem Übergang von einer unendlichen Zielparameterzahl zu einer endlichen, optimierten Führungsparameterzahl zwar bei Betrachtung der Gesamtperiode zwischen der Führungs- und der Zielfunktion eine Abweichung auftritt, die aber im wesentlichen auf Randbereiche jeder Halbperiode verschoben ist. Dagegen ist in einem Periodenteilintervall, das durch die Randbereiche von dem Umkehrpunkten der periodischen Bewegung getrennt ist, die Führungsfunktion mit endlicher, optimierter Parameterzahl wesentlich besser an die Zielfunktion angepaßt als eine Fourier-Reihenentwicklung einer Rampenfunktion.

Soll der Gegenstand mit einer bestimmten Grundfrequenz bewegt werden, so wird die Zahl n der zu berücksichtigenden Frequenzkomponenten (Harmonische) und somit der Führungsparameter in Abhängigkeit von der Frequenzantwort oder -charakteristik des Gegenstands gewählt. Die Wahl erfolgt vorzugsweise derart, daß beim n -fachen Wert der Grundfrequenz die Frequenzantwort größer als Null ist und oberhalb einer bestimmten Grenze liegt. Die Grenze kann beispielsweise einer bestimmten Dämpfung (z. B. Faktor 1/100) bei hohen Frequenzen in Bezug auf die ungedämpfte Frequenzantwort bei niedrigen Frequenzen entsprechen.

Der erfindungsgemäße Bewegungsablauf kann beispielsweise durch ein Treibersignal für Antriebsmittel des Gegenstandes vorgegeben werden, wobei das Treibersignal als Soll- oder Stellsignal aus der Führungsfunktion und dem Sensorsignal gebildet ist. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sind die Antriebsmittel Teil eines Regelkreises, der ferner Sensormittel zur Erfassung des Bewegungszustandes (insbesondere der Position oder Auslenkung) des Gegenstandes, Analogverstärkungsmittel und Signalformungsmittel zur Bildung des Treibersignals enthält.

Gemäß einem weiteren Aspekt wird erfindungsgemäß ein Regelungsverfahren zur Einstellung einer Regelgröße unter Verwendung einer kompensierten Führungsfunktion angegeben. Die Regelgröße kann sich periodisch ändern wie z. B. bei der periodischen Bewegung eines Gegenstands mit einer Grundfrequenz, wobei eine Ortskoordinate des Gegenstands einer Führungsfunktion entspricht, die durch eine Überlagerung von Sinusfunktionen der Grundfrequenz und deren Harmonischen gebildet ist, wobei Antriebsmittel des Gegenstandes entsprechend einer Treiberfunktion angesteuert werden, die durch eine frequenzabhängig amplituden- und phasenkompensierte Überlagerung der Sinusfunktionen gebildet ist. Dabei werden in die Sinusfunktionen frequenzabhängige Amplituden- bzw. Phasenkompensationsparameter eingeführt, die aus einer Amplituden-Frequenz- bzw. Phasen-Frequenz-Charakteristik der Antriebsmittel oder bei Integration in einen Regelkreis durch ein iteratives Verfahren erfaßt werden.

Bei dem erfindungsgemäßen iterativen Verfahren werden nach Vorgabe von Schätzwerten für die Amplituden- und Phasenkompensationsparameter die Antriebsmittel wiederholt für eine vorbestimmte Anzahl von Vorlaufzyklen entsprechend einer geschätzten Treiberfunktion angesteuert, wobei das jeweils gemessene und über die Vorlaufzyklen gemittelte Signal der Sensormittel einer Fourieranalyse unterzogen und die Schätzwerte entsprechend den ermittelten Fourierkomponenten korrigiert werden, bis das Sensorsignal im wesentlichen der Führungsfunktion entspricht. Bei der Fourieranalyse bleiben ein oder zwei Zyklen (Einschwingvorgang am Beginn der Treiberfunktion) unberücksichtigt.

Die erfindungsgemäßen Verfahren werden vorzugsweise einzeln oder in Kombination zur Ansteuerung von Galvanometerspiegeln, beispielsweise in Laser-Scanning-Mikroskopen verwendet.

Erfindungsgemäße Vorrichtungen zur Implementierung der erfindungsgemäßen Verfahren werden durch einen Regelkreis gebildet, der Antriebsmittel für den zu bewegenden Gegenstand, Sensormittel zur Erfassung des Bewegungszustands des Gegenstands in Bezug auf mindestens eine Ortskoordinate, Analogverstärkermittel zur Bereitstellung eines Sensoren- oder Istssignals, Rückkopplungsverstärkermittel, Speichermittel und Signalformungsmittel für die Bildung eines Treibersignals in den Antriebsmitteln aus dem Istsignal und einer Führungsfunktion umfaßt.

Ausführungsformen und Vorteile der Erfindung werden im folgenden unter Bezug auf die beigefügten Figuren beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1: Kurvendarstellungen zur Illustration der erfindungsgemäßen Bildung einer Führungsfunktion;

Fig. 2: ein Flußdiagramm zur Erläuterung eines erfindungsgemäßen Iterationsablaufs zur Ermittlung von Kompensationsparametern;

Fig. 3: Kurvendarstellungen zur Illustration der erfindungsgemäß kompensieren Führungsfunktion;

Fig. 4: eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Regelanordnung; und

Fig. 5: eine Darstellung zur Illustration der Ansteuerung von schrittförmigen Verstellbewegungen.

Die Erfindung wird im folgenden am Beispiel der Ansteuerung eines Galvanometerspiegels in einem LSM erläutert. Die ideale Zielfunktion der Spiegelauslenkung wäre eine Dreiecks- oder eine Rampenfunktion (sog. Sägezahmfunktion). Die Dreiecksfunktion hat gegenüber der Rampenfunktion die folgenden Vorteile: Durch die Trägheit des Spiegels und die Obergrenzen der zulässigen Treiberstromstärken ist die maximale Winkelbeschleunigung des Spiegels begrenzt. Dies wirkt sich bei der Rampenfunktion stärker aus als bei der Dreiecksfunktion. Außerdem können bei der Dreiecksfunktion beide Halbzyklen der Periode verwendet werden, so daß höhere maximale Zeilenfrequenzen zu erwarten sind. Die folgende Erläuterung bezieht sich auf Dreiecksfunktionen. Entsprechende Lösungen ergeben sich für Rampenfunktionen (siehe unten).

Es wird eine periodische (repetitive) Auslenkung eines Galvanometerspiegels mit einer Grundfrequenz f_0 betrachtet. Nach einem initialen Einschwingvorgang ist die Auslenkung vorteilhafterweise durch eine Fourierreihe darstellbar. Wegen der Symmetrie der Dreiecksfunktion fallen die Reihenglieder entsprechend den geradzahligen Harmonischen der Grundfrequenz weg und es ergibt sich eine Sinus-Reihe

$$[y(t) = \sum_k^{\infty} a_k \cdot \sin(kf_0 t)]$$

5 Eine nach wenigen Termen abgebrochene Reihenentwicklung stellt in der Regel bereits eine gute Näherung für die entwickelte Funktion dar. Da die Amplituden-Frequenz-Charakteristik (sog. Transferfunktion) von Spiegelgalvanometersystemen ohnehin oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz schnell abfällt, ist es sinnvoll, die Zahl der berücksichtigten Frequenzkomponenten zu beschränken. Es hat sich gezeigt, daß bereits bei Rechnung mit einer Summe, die nur die Grundwelle und die dritte Harmonische enthält, für ein Periodenteilintervall von 75% der Gesamtperiode gute Linearisierungsergebnisse erzielbar sind.

10 **Fig. 1A** zeigt eine Kurvendarstellung der linearen Funktion $2x/\pi$ (gepunktet) und der entsprechenden Fourierentwicklung (durchgezogen) im Bereich $\pm \pi$. Die Fourierentwicklung ist nach dem Summanden der dritten Harmonischen abgebrochen. Im Bereich $\pm \pi/2$ zeigt sich eine verhältnismäßig starke Abweichung (gestrichelt) zwischen beiden Funktionen (willkürliche Einheiten).

15 Erfindungsgemäß werden jetzt die Fourierkoeffizienten (Zielparameter) aus der Entwicklung gemäß **Fig. 1A** verändert, um eine Führungsfunktion mit optimierten Führungsparametern zu erhalten.

Die Funktion

$$y = A(\sin x + b \sin 3x) \quad (1)$$

20 wird im Wertebereich ± 1.2 rad (Periodenteilintervall) durch Variation der freien Parameter A und b an die Funktion $2x/\pi$ angepaßt. Das Optimierungskriterium ist die Minimierung der quadratischen Abweichung. Ein Minimum liegt bei den Werten $A = 0.774$ und $b = -0.073$.

25 **Fig. 1B** zeigt das Ergebnis der Parameteroptimierung. Es zeigt sich eine geringere Abweichung (gestrichelte Kurve) zwischen der Führungsfunktion (durchgezogen) und der Zielfunktion (gepunktet) als bei **Fig. 1A**. Bei einem Arbeitszyklus von 75% der Gesamtperiode ist eine Abweichung vom gewünschten linearen Verlauf von weniger als 1.5% erzielbar.

30 Erfindungsgemäß wird der Galvanometerspiegel so angesteuert, daß sein Bewegungsablauf der Funktion (1) folgt, wobei y beispielsweise eine Winkelkoordinate eines axial gedrehten Spiegels und $x = f_0 t$ ist.

35 Die Zahl n der in die Rechnung einbezogenen Fourierkomponenten, die Parameter A , b , ... und die Breite des Periodenteilintervalls sind je nach den konkreten Anforderungen des Meßsystems zu bestimmen. Die Zahl n ist beispielsweise so wählbar, daß höhere Harmonische (z. B. die fünfte Harmonische) berücksichtigt werden. Dies ist jedoch nur sinnvoll, wenn f_0 kleiner oder gleich der Grenzfrequenz des Spiegelsystems ist. Um eine weitere Verbesserung der Führungsparameter zu erzielen, muß gegebenenfalls also die Grundfrequenz f_0 der Spiegelbewegung gesenkt werden. Die Grundfrequenz ist (unter Vergrößerung von n) stetig bis zu Frequenzen absenkbare, bei denen herkömmliche streng rückgekoppelte Spiegel betrieben werden, bei denen die Führungsfunktion durch die Zielfunktion gegeben ist. Diese Kompatibilität stellt einen besonderen Vorteil der erfindungsgemäßen Bewegungssteuerung dar.

40 Ersatzweise ist auch eine weitere Linearisierung zu erzielen, wenn das Periodenteilintervall verkleinert wird (z. B. auf Werte unterhalb von 75% des Arbeitszyklus). Es ist aber auch eine Vergrößerung des Periodenteilintervalls möglich, sofern die systembedingten, maximal zulässigen Winkelbeschleunigungen nicht überschritten werden.

45 Ein alternatives Optimierungskriterium ergibt sich aus der Beschreibung der linearen Bewegung als im wesentlichen beschleunigungsfreie Bewegung im gewünschten Periodenteilintervall. In diesem Fall ist beispielsweise die zweite Zeitableitung der Funktion (1) zu minimieren, wobei ggf. Randbedingungen zu erfüllen sind (z. B. Ausschluß der Bewegungslosigkeit $y = 0$).

50 In das Optimierungskriterium kann als Randbedingung auch eine Beschränkung der Amplituden eingehen, um bei Implementierung des Verfahrens in einem Regelkreis mit Analogverstärkung eine Verzerrung der Führungsfunktion durch Nichtlinearitäten des Verstärkers zu vermeiden. Das Maß für die Beschränkung der Amplitude wird in Abhängigkeit von der Charakteristik des Verstärkers gewählt.

55 Falls die Zielfunktion durch eine Rampenfunktion gegeben ist, so führt die dargestellte Ermittlung des erfindungsgemäßen Bewegungsablaufs unter Verwendung von drei Fourierkomponenten zu der Funktion

$$y = \sin x - 0.287 \sin 2x + 0.062 \sin 3x \quad (2)$$

60 $(x = f_0 t)$. Die Parameter sind wiederum je nach Meß- und Systembedingungen veränderlich.

65 Anstelle der Fourierentwicklung sind auch andere Reihenentwicklungen verwendbar, z. B. eine Potenzreihenentwicklung. Die Fourierentwicklung wird jedoch bei periodischen Bewegungen bevorzugt.

70 In einem LSM wird zur Implementierung des erfindungsgemäßen Verfahrens ein Regelkreis gebildet, der als Antriebsmittel für den zu bewegenden Spiegel ein Galvanometersystem mit einem Positions- oder Auslenkungssektor zur Erfassung des Bewegungszustands des Spiegels, Analogverstärkermittel zur Bereitstellung eines Sensor- oder Istsensors, Rückkopplungsverstärkermittel und Signalformungsmittel für die Bildung eines Treibersignals im Galvanometersystem aus dem Istsignal und einer Führungsfunktion umfaßt. Die Führungsfunktion wird von einer Steuereinheit bereitgestellt. Die Ermittlung der Führungsfunktion erfolgt zumindest teilweise programmgesteuert. Die Reihenentwicklungen können auch mit entsprechenden Analogschaltungen implementiert werden.

75 Im folgenden wird die erfindungsgemäße Kompensation des Frequenzverhaltens mit frequenzabhängigen Amplituden- bzw. Phasenkompensationsfaktoren beschrieben.

80 Herkömmliche Galvanometersysteme (Galvanometer mit Rückkopplungsverstärker) besitzen bei optimaler Einstellung der Analogelektronik eine Grenzfrequenz von 500 Hz bis 1 kHz. Überschreitet das Führungssignal diese Frequenz, so ist die resultierende Bewegung abgeschwächt (Abschwächung $a(f)$) und phasenverzögert (Phasenverzögerung $\phi(f)$).

Die Transferfunktion (Amplitudenresponse) kann beispielsweise bei Frequenzen oberhalb 2 kHz ganz auf Null abfallen, oder die Phasenverzögerung kann bei 1 kHz 90° betragen. Um dennoch eine möglichst hohe Arbeitsfrequenz des Galvanometersystems zu erzielen, wird erfindungsgemäß bei einer Dreiecksansteuerung gemäß dem obigen Ausführungsbeispiel eine modifizierte (kompensierte) Führungsfunktion gemäß

$$y_{\text{komp}} = A \cdot \left(\frac{(\sin(f_0 t - \phi(f))}{a(f)} + b \cdot \frac{(\sin(3f_0 t - \phi(3f))}{a(3f)} \right) \quad (3)$$

vorgegeben.

Die Grundfrequenz f_0 wird nahe der Grenzfrequenz ausgewählt, so daß eine Abschwächung und Verzögerung sowohl der Grundwelle als auch – entsprechend der Transferfunktion in noch stärkerem Maße – der höheren Harmonischen auftritt. Die Kompensationsfaktoren $a(f)$ und $\phi(f)$ entsprechen gerade der Abschwächung und Phasenverzögerung. Diese Kompensation kann ggf. auf Bewegungsabläufe mit kleinen Amplituden (kleine Auslenkung, kleiner Probenbereich) beschränkt sein, um das Eintreten in einen nichtlinearen Verstärkungsbereich zu vermeiden.

Die Kompensation gemäß Gleichung (3) kann auf beliebige periodische Ziel- und Führungsfunktionen verallgemeinert werden. Der wesentliche Unterschied zur herkömmlichen elektronischen Kompensation durch frequenzunabhängige Verstärkungserhöhung besteht darin, daß eine Modifizierung der Führungsfunktion derart erfolgt, daß frequenzabhängige Abschwächungs- und Phasenverzögerungsfaktoren in jeden Summanden der optimierten Führungsparameterdarstellung eingehen.

Die Amplituden- bzw. Phasenkompensationsfaktoren lassen sich wie folgt bestimmen.

Grundsätzlich lassen sich die Kompensationsfaktoren durch separate Vermessung des jeweiligen Galvanometersystems (Amplituden-Frequenz- und Phasenverzögerungs-Frequenz-Abhängigkeiten) bestimmen. Dies ist jedoch zeitaufwendig und führt nur zu einer eingeschränkten Genauigkeit, da die Abhängigkeiten selbst amplitudenabhängig sind und es in der Praxis unannehbar ist, für jede mögliche Amplitude (Auslenkung, d. h. Probenbereich bei der LSM-Anwendung die genau passenden Kurvenscharen zu speichern. Ferner wird eine hohe Phasengenauigkeit gefordert, wenn beide Halbzyklen des Bewegungsablaufs zur Datengewinnung genutzt werden sollen. Daher wird erfindungsgemäß ein iteratives Verfahren vorgeschlagen, das im folgenden unter Bezug auf die Fig. 2 bis 4 beschrieben wird.

Das Ziel der Iteration besteht darin, Parameter für eine kompensierte Führungsfunktion y_{komp} (oder: Treibersfunktion) gemäß Gleichung (3) derart zu ermitteln, daß der Galvanometerspiegel (Sensorsignal) effektiv einen Bewegungsablauf gemäß Gleichung (1) zeigt.

Gemäß Fig. 2 werden nach dem Start der Kompensationsparameterbestimmung zunächst Startwerte vorgegeben (Schritt S1). Die Startwerte enthalten die gewünschte Amplituden- bzw. Grundfrequenzwerte, Startschätzwerte für die Amplituden- und Phasenkompensationsfaktoren, Grenzwerte (S), die ein Abbruchkriterium für die Iteration repräsentieren, und Parameter der digitalen Sensorsignalverarbeitung. Letztere umfassen eine Zahl P der pro Zyklus zu erfassenden Punkte (Abtastpunkte), ein mit P und der Grundfrequenz in Zusammenhang stehendes Abtastintervall I, eine Zahl Z der Zyklen (Vorlaufzyklen), die in die jeweilige Sensor- oder Istsignalerfassung eingehen soll, und eine Zahl der Zyklen, die in der Einschwingphase nicht berücksichtigt werden sollen.

Mit den Amplituden- bzw. Grundfrequenzwerten wird eine unkomplizierte Führungsfunktion für die Zeilenablenkung gemäß Gleichung (1) berechnet (Schritt S2).

Anschließend wird eine kompensierte Führungsfunktion beispielsweise gemäß Gleichung (3) mit den Startschätzwerten für die Amplituden- und Phasenkorrektur berechnet (Schritt S3) und der Galvanometerspiegel mit einem entsprechenden Treibersignal angesteuert (Schritt S4). Das über Z Vorlaufzyklen gemittelte Sensorsignal (Z kann beispielsweise 50 betragen, wobei die ersten Zyklen wegen des Einschwingens nicht in die Mittelung eingehen) soll mit der unkomplizierten Führungsfunktion gemäß Gleichung (1) verglichen und die Abweichung beurteilt werden. Dazu erfolgt zunächst eine Fourieranalyse des Sensorsignals (Schritt S5), wobei die ersten vier Fourierkomponenten berechnet werden. Die zweiten und vierten Harmonischen werden überprüft, um sicherzustellen, daß ihre Amplituden wesentlich kleiner bzw. vernachlässigbar sind im Vergleich zur Grundwelle und der dritten Harmonischen. Die Startschätzwerte werden als neue Kompensationsparameter entsprechend den ermittelten Fourierkomponenten linear angepaßt oder korrigiert.

Falls der gemessene Amplitudenwert (Sensorsignal) einer höheren oder geringeren Amplitude entspricht als der gewünschte Amplitudenwert der Führungsfunktion, so soll eine Korrektur des Amplituden-Kompensationsparameters jeweils entsprechend zu kleineren oder größeren Werten erfolgen. Der Phasen-Kompensationsparameter hingegen soll korrigiert werden, bis die gemessene Phasenverschiebung vernachlässigbar ist. Die Entscheidung über einen weiteren Korrekturschritt wird bei Prüfung eines Abbruchkriteriums getroffen (Schritt S8). Das Abbruchkriterium ist erfüllt, falls der absolute Abstand zwischen dem gemessenen Amplitudenwert (Sensorsignal) und dem gewünschten Amplitudenwert der Führungsfunktion oder das Verhältnis der letzten Amplitudenänderung relativ zum gewünschten Amplitudenwert bzw. die Phasenverzögerung unterhalb vorbestimmter Schwellwerte liegen. Der Schwellwert für den relativen Amplitudenabstand kann z. B. mit 1% des gewünschten Amplitudenwerts angesetzt werden. Der Schwellwert für die Phasenverzögerung kann z. B. in einem Bereich zwischen 0° und 5°, vorzugsweise bei 1° liegen.

Ist das Abbruchkriterium nicht erfüllt, so erfolgt ein weiterer Iterationszyklus mit korrigierten Kompensationsparametern. Es ist praktikabel, bei jedem Iterationsschritt nur etwa 80% der gemessenen Abweichung in einem Schritt zu kompensieren. Damit wird in vorteilhafterweise die Stabilität der Iteration erhöht. Bei Erfüllung des Abbruchkriteriums werden die Kompensationsparameter gespeichert (Schritt S9) und das Verfahren beendet.

Bei der folgenden Spiegelansteuerung wird die Führungsfunktion mit den Kompensationsparametern gemäß Gleichung (3) modifiziert und das Treibersignal für den Spiegelantrieb entsprechend eingerichtet.

Fig. 3 zeigt beispielhaft Kurvendarstellungen zur Illustration der erfindungsgemäßen Kompensation der Führungsfunktion, wobei auf der Abszissenachse jeweils die Nummer der Abtastpunkte als Zeitmaßstab aufgetragen ist. Kurve A stellt eine Führungsfunktion gemäß Gleichung (1) dar. Dies ist also der Bewegungsablauf, dem der Spiegel folgen soll,

beispielsweise um optimal einem Linearisierungskriterium entsprechend dem eingangs erläuterten ersten Aspekt der Erfindung zu entsprechen. Kurve B zeigt die erfundungsgemäß modifizierte (kompensierte) Führungsfunktion, die im Regelkreis real als Führungsgröße für das Treibersignal verwendet wird, um ein Sensorsignal gemäß Kurve C zu erhalten, das aufgrund der Kompensation im wesentlichen dem gewünschten Bewegungsablauf gemäß Kurve A entspricht. Kurve C zeigt eine Abweichung von Kurve A lediglich in der Einschwingphase, in der die Bedingungen für die Rechnungen mit periodischen Funktionen noch nicht erfüllt sind.

Eine Vorrichtung zur Implementierung der erfundungsgemäßen Ermittlung der Kompensationsparameter ist in **Fig. 4** gezeigt. Die Spiegelanordnung **10** mit einem Ablenkspiegel **11** und einem Galvanometer (mit Sensor) **12** wird mit einer Regeleinheit **20** angesteuert. Die Regeleinheit **20** besitzt einen Anschluß **21** zur Bereitstellung des Sensorsignals, das 10 nach Verstärkung mit dem Verstärker **23** an den ADC-Eingang einer Signalformungs- und Steuerungsschaltung **30** angelegt wird. Das abgetastete Sensorsignal wird zur weiteren Verarbeitung (Schritte S5 bis S8, siehe oben) an eine Recheineinheit **40** geliefert, die jeweils die korrigierte Führungsfunktion bereitstellt, die über den DAC-Ausgang der Signalformungs- und Steuerungsschaltung **30** an die Regeleinheit **20** zur Bildung eines korrigierten Treibersignals geliefert wird. Zusätzlich ist ein Anzeigemittel **50** (z. B. Oszilloskop) zur Überwachung des Iterationsvorgangs vorgesehen.

15 Bei schrittartigen, einmaligen Einstellbewegungen ist eine alternative Kompensation möglich, die eine Abwandlung gegenüber der oben unter Bezug auf **Fig. 2** erläuterten Verfahrensweise darstellt. Falls ein Gegenstand einmalig verstellt werden soll, wie beispielsweise ein Zeilenwechselspiegel beim LSM, so erfolgt dies herkömmlich durch eine Rechteck-Schrittfunktion. Wegen der Trägheit des Gegenstands wird dessen Ausrichtung, Verschwenkung o. dgl. jedoch nicht exakt der Schrittfunktion folgen, sondern Verzögerungs- bzw. Überschwingerscheinungen zeigen. Daher wird statt der 20 Rechteck-Schrittfunktion eine modifizierte Kompensations-Schrittfunktion verwendet, wie sie in **Fig. 5** illustriert ist.

25 Die Kompensations-Schrittfunktion ist dadurch gekennzeichnet, daß die Amplitude gegenüber der Stellamplitude, die der gewünschten Schrittverstellung (Schrittgröße) entspricht, zunächst für eine Überschwingzeit D1 um einen Überschwingwert A1 vergrößert und anschließend für eine Unterschwingzeit D2 um einen Unterschwingwert A2 verkleinert wird, bevor die Stellamplitude angenommen wird. Die vier Parameter A1, D1, A2 und D2 werden in Abhängigkeit von den dynamischen Eigenschaften des zu bewegenden Gegenstandes so gewählt, daß im Zeitbereich nach einem Intervall T1 die Abweichung der Verstellung vom gewünschten Wert möglichst gering ist. Die Summe aus Überschwingzeit D1 und Unterschwingzeit D2 ist somit kleiner als das Intervall T1.

30 Bei der Anwendung zur Ansteuerung des Zeilenwechselspiegels in einem LSM ist das das Intervall T1 so gewählt, daß nach Ablauf von T1 der nächste lineare Bereich der Zeilenablenkung folgt.

35 Die Erfindung löst vorteilhafterweise insbesondere das Problem, wie ein Laserstrahl zur rasterartigen Ablenkung z. B. mit einem Galvanometerspiegel mit möglichst hoher Wiederholfrequenz möglichst linear in einem maximalen Teilbereich des Arbeitszyklus über ein Objekt oder einen Winkelbereich geführt werden kann. So konnte beispielsweise beim kommerziell verfügbaren Galvanometersystem AMP3 des Herstellers LOBO mit einem verwertbaren Auslenkbereich von 1.5° (optischer Winkelbereich) eine Abtastfrequenz von 4000 Zeilen pro Sekunde erzielt werden. Dies stellt eine erhebliche Erhöhung gegenüber dem Vergleichswert des Standes der Technik der rückgekoppelten Galvanometerspiegel von nur 1000 Zeilen pro Sekunde dar. Wird ein größerer Auslenkbereich gewünscht, so muß die Grundfrequenz erniedrigt werden. Eine optimale Auslenkung über 15° , was dem Vollbild an einem LSM entspricht, wurde mit einer Grundfrequenz $f_0 = 670$ Hz, d. h. mit 1340 Zeilen pro Sekunde erzielt. Bei einer Grundfrequenz $f_0 = 1$ kHz (2000 Zeilen pro Sekunde) konnten 60% des Vollbilds abgetastet werden.

40 Weitere Vorteile bei Anwendung der Erfindung in einem LSM ergeben sich daraus, daß mit einem Arbeitszyklus von 75% die Meßzeit wesentlich besser genutzt wird als bei herkömmlichen Systemen, ohne daß eine Linearisierung der Datenaufnahme erforderlich ist.

45 Zur flächigen Abtastung einer Probe mit dem LSM sind gewöhnlich mindestens zwei Galvanometerspiegel erforderlich, von denen einer für die Zeilenabtastung und ein weiterer für die Zeilenweiterschaltung (Auslenkung senkrecht zur Zeilenablenkung des ersten Spiegels) eingerichtet ist. Die obige Erläuterung bezog sich lediglich auf den Galvanometerspiegel für die Zeilenabtastung. Bei der Zeilenweiterschaltung ist ein schneller Bewegungsablauf nicht so kritisch, da etwa 12% des Arbeitszyklus für eine kleine, schrittartige Änderung zur Verfügung stehen. Bei schneller Zeilenschaltung kann die Erfindung (insbesondere die Frequenzkompensation) jedoch auch zur Steuerung der Zeilenweiterschaltung realisiert werden, wodurch schrittartige Änderungen mit typischen Zeiten von weniger als 100 μ s erzielbar sind.

50 Die Erfindung wurde am Beispiel des LSM illustriert, ist aber auch bei anderen Anwendungen realisierbar, bei denen ein Gegenstand mit träger Masse entsprechend einer Führungsfunktion schnell periodisch bewegt werden soll. Dies betrifft z. B. generell bewegte Abtastreflektoren, z. B. in Laser-Druckern oder bei Lichteffektdarstellungen (Lasershow), aber auch bewegte Abtastsignalquellen oder feldformende Elemente (z. B. Spulen, Elektroden) oder dergleichen.

55 Die unter Bezug auf die **Fig. 2** und **3** erläuterten Prinzipien der Amplituden- und Phasenkompensation sind nicht auf Bewegungssteuerungen beschränkt, sondern lassen sich bei beliebigen Rückkopplungsschaltungen einsetzen.

Patentansprüche

60 1. Verfahren zur periodischen Bewegung eines Gegenstands, so daß eine Ortskoordinate des Gegenstands mindestens in einem Periodenteilintervall an eine Zielfunktion $y'(t)$ angepaßt ist, gekennzeichnet durch die Schritte:
– Parametrisierung der Zielfunktion als Reihenentwicklung gemäß

$$y'(t) = \sum_i^{\infty} a'_i \cdot A_i(t) ,$$

65 – Bestimmung von n Führungsparametern a_1, a_2, \dots, a_n , für die in dem Periodenteilintervall für eine Führungsfunktion

$$y(t) = \sum_i^n a_i \cdot A_i(t)$$

ein Optimierungskriterium erfüllt ist, und

5

– Ansteuerung eines Antriebsmittels des Gegenstands derart, daß dessen Ortskoordinate der Führungsfunktion $y(t)$ entspricht.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem der Gegenstand mit einer Grundfrequenz f_0 bewegt wird und die Reihenentwicklung eine Fourierentwicklung ist.

10

3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, bei dem das Optimierungskriterium erfüllt ist, falls im Periodenteilintervall die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen der Führungs- und der Zielfunktion minimal ist.

4. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, bei dem das Optimierungskriterium erfüllt ist, falls im Periodenteilintervall die zweite Zeitableitung der Funktion $y(t)$ minimal ist.

15

5. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 4, bei dem die Zahl der in die Reihenentwicklung eingehenden Frequenzkomponenten in Abhängigkeit von einer Frequenzcharakteristik des Gegenstands ausgewählt wird.

6. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 5, bei dem die Zielfunktion eine gerade lineare Funktion ist und die Führungsfunktion die Form

$$y(t) = A (a_1 \cdot \sin(f_0 t) + a_3 \cdot \sin(3f_0 t))$$

20

besitzt.

7. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 5, bei dem die Zielfunktion eine ungerade lineare Funktion ist und die Führungsfunktion die Form

$$y(t) = A (a_1 \cdot \sin(f_0 t) + a_2 \cdot \sin(2f_0 t) + a_3 \cdot \sin(3f_0 t))$$

25

besitzt.

8. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der bewegte Gegenstand ein Abtastspiegel in einem Laser-Scanning-Mikroskop mit einer Galvanometeranordnung ist, die entsprechend der Führungsfunktion angesteuert wird.

30

9. Regelungsverfahren zur Einstellung einer periodisch veränderlichen Regelgröße mit Antriebsmitteln entsprechend einer Führungsfunktion $y(t)$ der Form

$$y(t) = C \cdot \sum_k^n A_k \cdot \sin(kf_0 t),$$

35

wobei die Regelgröße gegenüber einer Treiberfunktion der Antriebsmittel eine Amplitudenverringerung und eine Phasenverzögerung aufweist, dadurch gekennzeichnet, daß die Treiberfunktion gemäß

$$y_{komp}(t) = C \cdot \sum_k^n (A_k / a_k(f_0)) \cdot \sin(kf_0 t - \phi(f_0)),$$

40

gebildet ist, wobei $a_k(f_0)$ und $\phi(f_0)$ frequenzabhängige Amplituden- bzw. Phasenkompensationsparameter sind.

10. Verfahren gemäß Anspruch 9, bei dem die Regelgröße eine Ortskoordinate eines Gegenstands ist, der periodisch bewegt werden soll, und eine Antriebsvorrichtung des Gegenstands entsprechend der Treiberfunktion angesteuert wird.

45

11. Verfahren gemäß Anspruch 10, bei dem die Führungsfunktion nach einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 8 gebildet ist.

12. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 9 bis 11, bei dem die Amplituden- und Phasenkompensationsparameter aus einer Amplituden-Frequenz- bzw. Phasen-Frequenz-Charakteristik der Antriebsmittel erfaßt werden.

50

13. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 9 bis 11, bei dem die Antriebsmittel Teil eines Regelkreises sind, der Sensormittel, Analogverstärkermittel und Signalformungsmittel zur Bildung der Treiberfunktion enthält, und die Amplituden- und Phasenkompensationsparameter durch ein iteratives Verfahren erfaßt werden, bei dem nach Vorgabe von Schätzwerten für die Amplituden- und Phasenkompensationsparameter die Antriebsmittel wiederholt für eine vorbestimmte Anzahl von Vorlaufzyklen entsprechend einer geschätzten oder korrigierten Treiberfunktion angesteuert werden, wobei ein Sensorsignal der Sensormittel während der Vorlaufzyklen mit der Führungsfunktion verglichen und die Schätzwerte korrigiert werden, bis das Sensorsignal der Führungsfunktion entspricht.

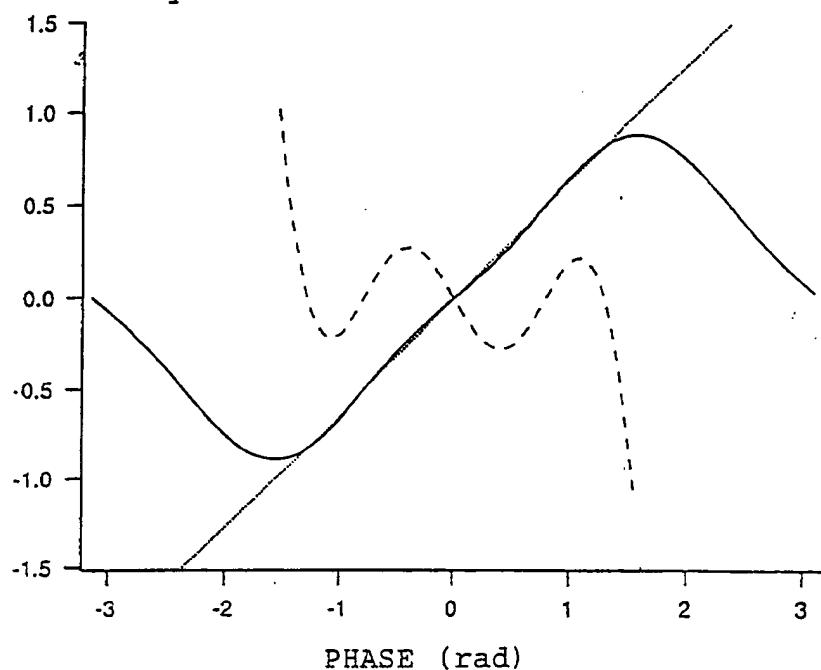
55

14. Verfahren gemäß Anspruch 13, bei dem zum Vergleich zwischen dem Sensorsignal und der Führungsfunktion das Sensorsignal einer Fourieranalyse unterzogen wird und die Fourierkomponenten an die Parameter der Führungsfunktion angepaßt werden.

60

15. Regelvorrichtung zur Implementierung eines Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 14, umfassend Antriebsmittel, Sensormittel, Analogverstärkermittel, Rückkopplungsverstärkermittel, Speichermittel und Signalformungsmittel.

A

FOURIER-NÄHERUNG
 $y=0.794(\sin x - 0.11\sin 3x)$ 

B

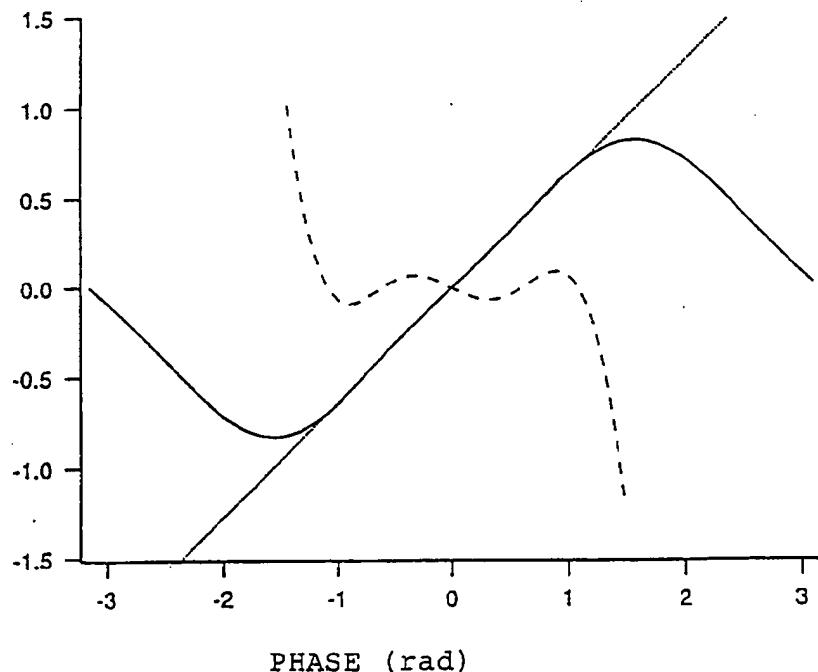
ANPASSUNG VON $x=-1.2$ BIS $x=+1.2$
 $y=0.7742(\sin x - 0.07334\sin 3x)$ 

Fig. 1

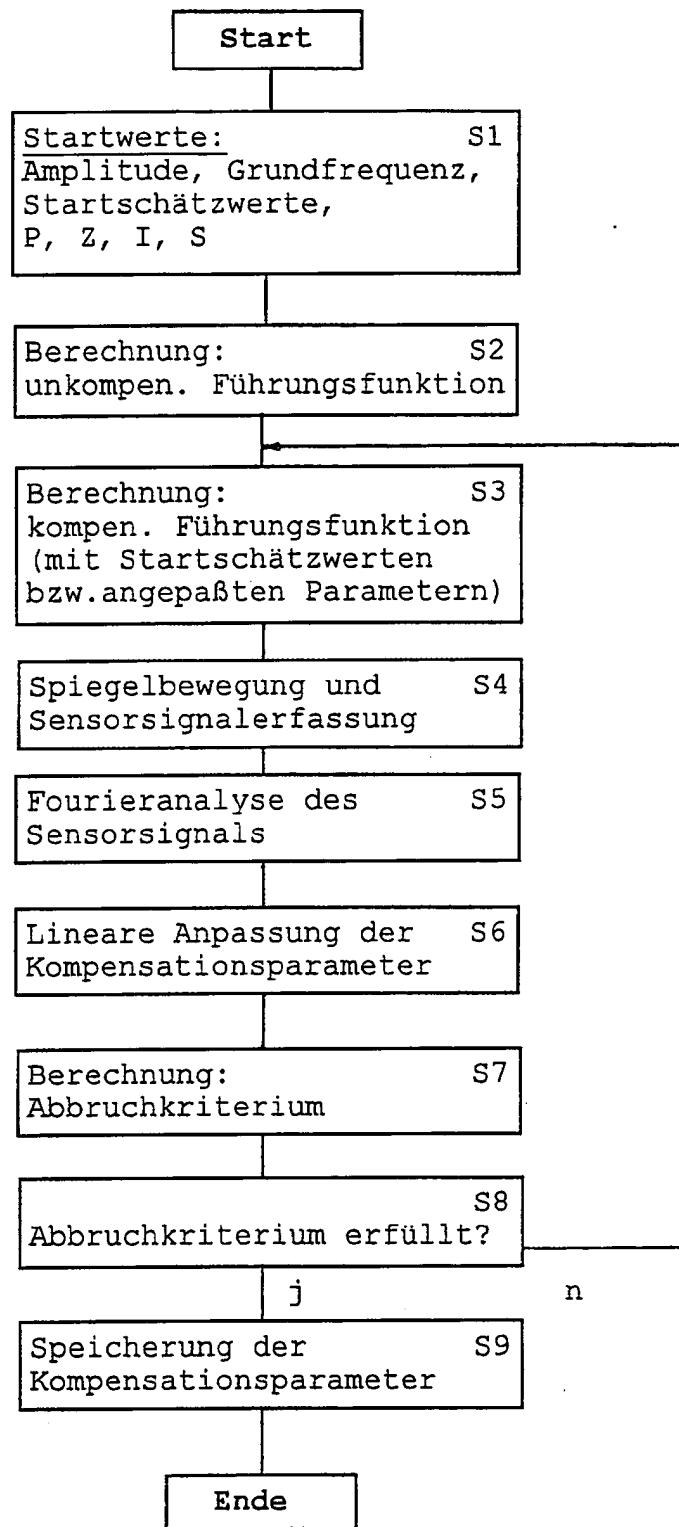


Fig. 2

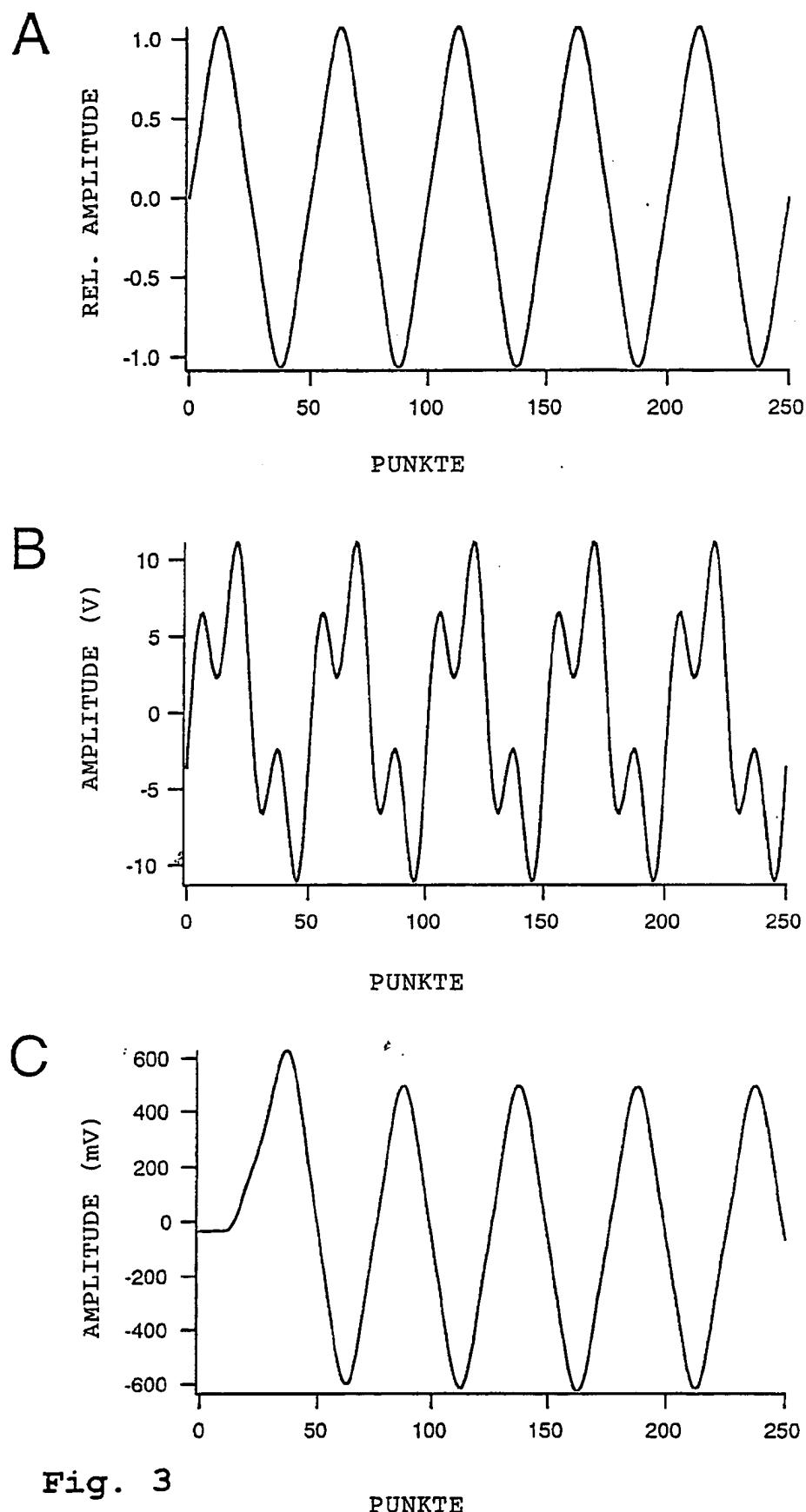


Fig. 3

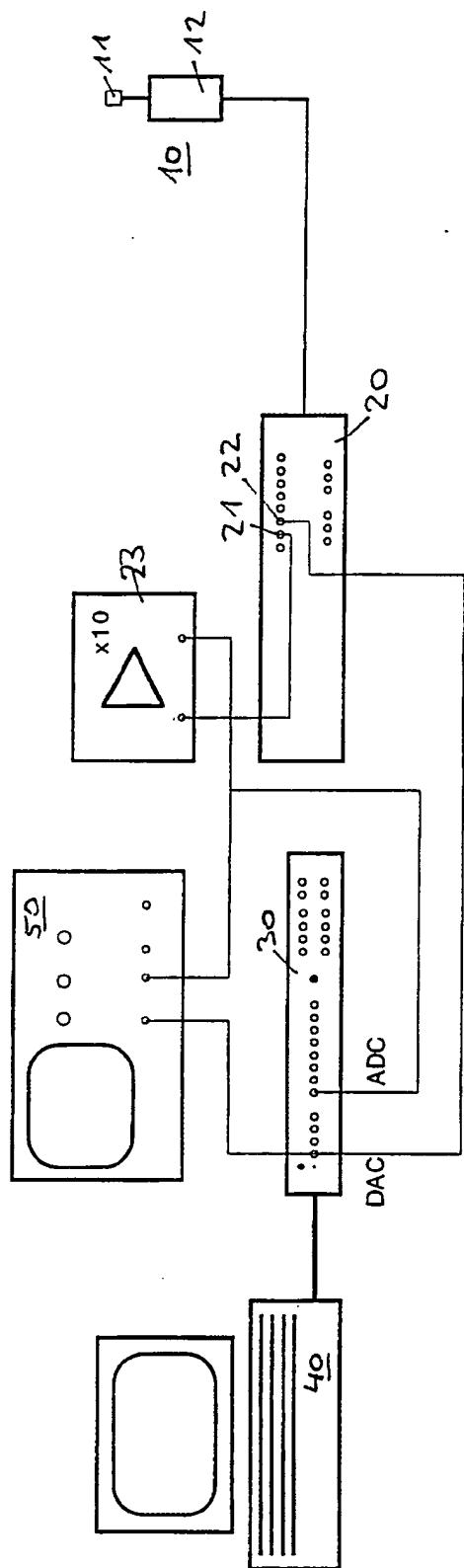


Fig. 4

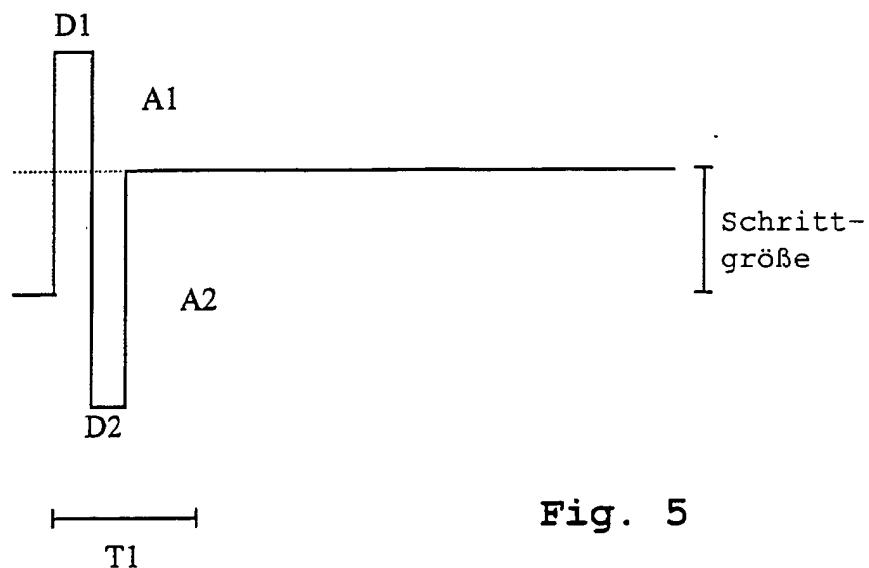


Fig. 5